

## NGHIÊN CỨU TỐI ƯU THÔNG SỐ IN 3D FDM SỬ DỤNG KẾT HỢP THIẾT KẾ THỰC NGHIỆM TAGUCHI VÀ TOPSIS

### OPTIMIZED STUDY OF 3D FDM PRINTING PARAMETERS USING COMBINED TAGUCHI EXPERIMENTAL DESIGN AND TOPSIS

VŨ VIỆT QUYỀN, ĐINH XUÂN THÀNH, VŨ THỊ THU TRANG\*

Viện Cơ khí, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam

\*Email liên hệ: trangvtt.vck@vimaru.edu.vn

DOI: <https://doi.org/10.65154/jmst.787>

#### Tóm tắt

Bài báo trình bày phương pháp tối ưu hóa đa mục tiêu cho các thông số in 3D FDM sử dụng vật liệu PLA. Nghiên cứu đề xuất một phương pháp lai kết hợp thiết kế thí nghiệm Taguchi L9 với phương pháp TOPSIS để giải quyết các mâu thuẫn khi tối ưu hóa đồng thời nhiều đặc tính đầu ra. Ba thông số đầu vào gồm nhiệt độ in, tốc độ in và đường kính đầu in đã được khảo sát. Các mục tiêu đầu ra bao gồm tối đa hóa độ cứng, độ dai va đập và tối thiểu hóa khối lượng mẫu. Phương pháp Entropy được sử dụng để xác định trọng số khách quan cho từng tiêu chí, sau đó phương pháp TOPSIS được áp dụng để chuyển bài toán đa mục tiêu thành một bài toán đơn mục tiêu thông qua việc tính toán hệ số tương đối gần  $CC_i$ . Kết quả phân tích Taguchi-TOPSIS đã xác định bộ thông số tối ưu gồm nhiệt độ in là 220°C, tốc độ in là 40mm/s và đường kính đầu in là 0,3mm. Phân tích ANOVA của hệ số  $CC_i$  cho thấy nhiệt độ in là thông số có ảnh hưởng lớn nhất tác động 49,25% đến hiệu suất đa mục tiêu, tiếp theo là tốc độ in 23,99% và đường kính đầu in 21,53%. Phương pháp này đã chứng minh tính hiệu quả trong việc tìm ra một giải pháp mạnh mẽ cho việc tối ưu hóa quy trình in 3D FDM.

**Từ khóa:** Tối ưu hóa đa mục tiêu, FDM, PLA, Taguchi, TOPSIS.

#### Abstract

This paper presents a multi-objective optimization method for FDM 3D printing parameters using PLA material. The study proposes a hybrid method combining Taguchi L9 design of experiments with TOPSIS method to resolve conflicts when optimizing multiple output properties simultaneously. Three input parameters including printing temperature, printing speed and printhead diameter were

investigated. The output objectives include maximizing stiffness, impact toughness and minimizing sample mass. Entropy method was used to determine the objective weight for each criterion, then TOPSIS method was applied to convert the multi-objective problem into a single-objective problem by calculating a relative coefficient close to  $CC_i$ . The Taguchi-TOPSIS analysis results determined the optimal parameter set including printing temperature of 220°C, printing speed of 40 mm/s and printhead diameter of 0.3mm. ANOVA analysis of  $CC_i$  coefficient showed that printing temperature was the most influential parameter affecting multi-objective performance by 49.25%, followed by printing speed by 23.99% and printhead diameter by 21.53%. This method proved to be effective in finding a robust solution for optimizing the FDM 3D printing process.

**Keywords:** Multi objective optimization, FDM, PLA, Taguchi, TOPSIS.

#### 1. Mở đầu

Sản xuất bồi đắp (Additive Manufacturing - AM) là một thuật ngữ bao quát cho nhóm các công nghệ chế tạo sản phẩm dựa trên nguyên lý đắp vật liệu theo từng lớp (Tofail et al., 2018). Công nghệ này đã trở thành một yếu tố then chốt trong nhiều lĩnh vực công nghiệp, đặc biệt là trong việc chế tạo nhanh các mẫu thử nghiệm, mang lại lợi thế kinh tế đáng kể (R. Kumar et al., 2021). Các phương pháp AM phổ biến bao gồm lắng đọng nóng chảy (FDM), in sợi nóng chảy (FFF), in nhựa lỏng (SLA) và thiêu kết laser chọn lọc (SLS). Trong số đó, kỹ thuật FDM được ứng dụng rộng rãi nhờ các ưu điểm như vận hành đơn giản, sự đa dạng của vật liệu đầu vào, tính linh hoạt và khả năng sản xuất hàng loạt (Dimitrellou et al., 2025). Vật liệu Axit polylactic (PLA) là một trong những vật liệu polyme phổ biến nhất trong công nghệ FDM, được ưa

chuộng bởi tính dễ gia công, khả năng tương thích sinh học và đặc tính phân hủy sinh học (Horný et al., 2025). Tuy nhiên, việc tối ưu hóa các đặc tính cơ học và chức năng của sản phẩm in 3D từ vật liệu PLA vẫn là một thách thức. Do đó, việc xác định một bộ thông số in tối ưu nhằm nâng cao các đặc tính cơ học của vật liệu là một hướng nghiên cứu cấp thiết.

Các đặc tính của sản phẩm FDM chịu ảnh hưởng trực tiếp bởi một tập hợp các thông số quy trình, bao gồm đường kính vòi phun, nhiệt độ vòi phun, mật độ điền đầy, dạng điền đầy, góc nghiêng đầu in, số lượng đường viền, tốc độ in và chiều cao lớp (Ahmad et al., 2022). Việc điều chỉnh các thông số này có ảnh hưởng trực tiếp đến các đặc tính cơ học, thời gian sản xuất và khối lượng của chi tiết. Bên cạnh các đặc tính cơ học, thời gian và khối lượng là các yếu tố quan trọng trong sản xuất. Do đó, việc áp dụng các kỹ thuật tối ưu hóa đa mục tiêu là rất quan trọng để xác định bộ thông số cân bằng tốt nhất (Singh et al., 2022). Tối ưu hóa đa mục tiêu đặt ra những thách thức đáng kể so với tối ưu hóa đơn mục tiêu, vì nó đòi hỏi sự cân bằng giữa các mục tiêu có thể xung đột lẫn nhau.

Nhiều nghiên cứu trước đây đã tập trung vào việc tối ưu hóa các thông số của quy trình FDM bằng các phương pháp thống kê và thuật toán. Các phương pháp phổ biến bao gồm phương pháp Taguchi, phân tích phương sai (ANOVA) và phân tích quan hệ xám (GRA). Nghiên cứu của John et al., (2023) đã khảo sát ảnh hưởng của hình học lưới in, tốc độ in và đường kính đầu in đối với các mẫu PLA theo tiêu chuẩn ASTM D638. Kết quả của nghiên cứu cho thấy đường kính đầu in là yếu tố có ảnh hưởng lớn nhất. K. Kumar & Singh, (2023) đã áp dụng GRA dựa trên phương pháp Taguchi để tối ưu hóa thông số FDM cho dụng cụ y tế bằng PLA, đạt được độ bền kéo 42,6MPa và mô đun đàn hồi 3274MPa, cho thấy tiềm năng của công nghệ này trong lĩnh vực y tế. Tương tự, (Liu et al., 2017) sử dụng thiết kế thực nghiệm Taguchi L27 kết hợp ANOVA và GRA để nghiên cứu ảnh hưởng của chiều dày lớp, kiểu lưới và kích thước đầu in đến độ bền kéo, uốn và va đập. Nghiên cứu của các tác giả này chỉ ra tốc độ in là thông số quan trọng nhất. (Nguyen et al., 2020) đã tiến hành tối ưu hóa đa mục tiêu cho chiều cao lớp, tỷ lệ lấp đầy, nhiệt độ và tốc độ in bằng cách kết hợp phương pháp Taguchi với thuật toán di truyền NSGA-II. (Patel et al., 2024) cũng thực hiện tối ưu hóa các thông số FDM cho vật liệu PLA, xác định bộ thông số tối ưu bao gồm tốc độ in 70mm/s, chiều cao lớp 0,2mm và mật độ điền đầy 40% để đạt được các đặc tính cơ học ưu việt. (Chinchani et al., 2024) đã sử dụng phương pháp bề mặt đáp ứng (RSM),

GA-TOPSIS và GA-GRA để tối ưu hóa các thông số FDM cho các chi tiết in bằng PLA. Thông số tối ưu mà nghiên cứu đưa ra là mật độ điền đầy 61,02%, độ dày lớp 0,26mm, tốc độ in 37,77mm/s và nhiệt độ in 191,1°C.

Kỹ thuật lựa chọn đa tiêu chí TOPSIS hoạt động bằng cách xác định bộ thông số tối ưu dựa trên nguyên tắc trực quan: Lựa chọn tốt nhất là lựa chọn có khoảng cách gần nhất đến giải pháp lý tưởng và đồng thời xa nhất so với giải pháp xấu nhất (Kelemenis & Askounis, 2010). Tương tự phương pháp GRA, TOPSIS có nhiều lợi thế, bao gồm hiệu quả tính toán và độ tin cậy, tính đơn giản và dễ dàng xác định hiệu suất so sánh (Taherdoost & Madanchian, 2024). Để tối ưu hóa các thông số in 3D FDM cho vật liệu PLA, việc kết hợp phương pháp thiết kế thí nghiệm Taguchi với phương pháp ra quyết định đa tiêu chí TOPSIS là một hướng tiếp cận hiệu quả và mạnh mẽ. Tuy nhiên, chưa có nhiều nghiên cứu kết hợp hai phương pháp này.

Trong bài báo này, phương pháp Taguchi được sử dụng để giảm đáng kể số lượng thí nghiệm cần thực hiện thông qua việc sử dụng các ma trận trực giao, giúp tiết kiệm thời gian và chi phí. Sau đó, các kết quả thu được từ những thí nghiệm này gồm nhiều mục tiêu mâu thuẫn nhau như độ cứng, độ dai va đập, khối lượng in sẽ được phân tích bằng TOPSIS để tìm ra tổ hợp thông số in tốt nhất. Sự kết hợp này tạo ra một quy trình tối ưu hóa hiệu quả về mặt thực nghiệm và mạnh mẽ trong việc ra quyết định lựa chọn.

## 2. Nguyên liệu và phương pháp thực nghiệm

### 2.1. Nguyên liệu và quá trình chế tạo mẫu

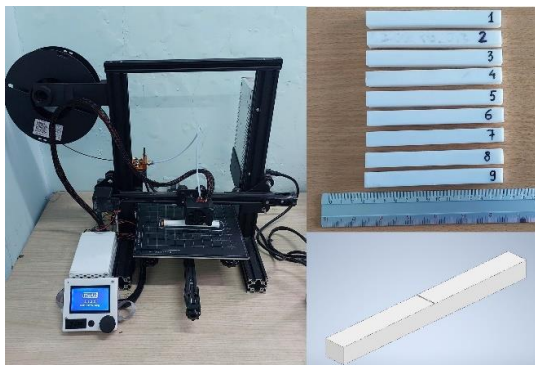
Nguyên liệu được sử dụng trong nghiên cứu này là sợi nhựa PLA của hãng Creality, Trung Quốc với đường kính danh định là 1,75mm. Các đặc tính kỹ thuật của sợi PLA được nhà sản xuất cung cấp và tổng hợp trong Bảng 1.

**Bảng 1. Đặc tính của vật liệu in PLA Creality**

| Đặc tính          | Giá trị               |
|-------------------|-----------------------|
| Nhiệt độ in       | 190-230°C             |
| Đường kính dây in | 1.75mm                |
| Khối lượng riêng  | 1.25g/cm <sup>3</sup> |
| Độ bền kéo        | 34MPa                 |
| Độ bền uốn        | 77MPa                 |
| Tốc độ in         | 40÷100 mm/s           |

Các mẫu thử nghiệm độ dai va đập được chế tạo theo tiêu chuẩn ASTM D6110 dành cho vật liệu nhựa. Quá trình chế tạo được thực hiện trên máy in 3D SME

v1.0 (Hình 1), một thiết bị hoạt động dựa trên công nghệ FDM do Viện Cơ khí, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam nghiên cứu và phát triển. Mô hình hình học của mẫu được thiết kế bằng phần mềm Autodesk Inventor 2023, sau đó được xử lý và chuyển đổi thành tệp G-code thông qua phần mềm cắt lớp Ultimaker Cura 5.5.0.



**Hình 1. Máy in 3D SME v1.0 và các mẫu thử va đập**

Các thông số in được giữ cố định trong suốt quá trình thực nghiệm bao gồm: Mật độ điền đầy 100%, 3 lớp viền ngoài, chiều cao layer 0,2mm, nhiệt độ bàn in 60°C và góc nghiêng đầu in 0°. Ba thông số đầu vào được lựa chọn để khảo sát là nhiệt độ đùn, tốc độ in và đường kính đầu in. Các mức giá trị của từng thông số được trình bày chi tiết trong Bảng 2.

**Bảng 2. Thông số quy trình in 3D FDM**

| Thông số          | Ký hiệu | Đơn vị | Giá trị |       |       |
|-------------------|---------|--------|---------|-------|-------|
|                   |         |        | Mức 1   | Mức 2 | Mức 3 |
| Nhiệt độ in       | T       | °C     | 200     | 210   | 220   |
| Tốc độ in         | V       | mm/s   | 40      | 50    | 60    |
| Đường kính đầu in | D       | mm     | 0.2     | 0.3   | 0.4   |



**Hình 2. Đo độ dai và đập trên thiết bị JBS-300**

## 2.2. Phương pháp đo lường và đánh giá

Độ dai và đập của các mẫu được xác định bằng phương pháp thử nghiệm Charpy trên thiết bị JBS-300 Jinan tại Trung tâm Thí nghiệm - Thực hành, Trường Đại học Hàng hải Việt Nam (Hình 2). Độ cứng bề mặt của mẫu được đo bằng máy đo độ cứng Shore D cầm tay Landtek HT-6510D theo tiêu chuẩn ASTM D2240. Giá trị độ cứng được ghi nhận là giá trị trung bình của ba lần đo tại các vị trí khác nhau, tuân thủ yêu cầu về khoảng cách tối thiểu giữa các điểm đo là 5mm và cách mép mẫu không dưới 10mm. Khối lượng của từng mẫu sau khi chế tạo được xác định bằng cân phân tích kỹ thuật GS-Shinko có độ chính xác cao.

## 2.3. Phương pháp thiết kế thí nghiệm và tối ưu hóa

Nghiên cứu này áp dụng phương pháp lai Taguchi - TOPSIS để giải quyết bài toán tối ưu hóa đa mục tiêu. Quá trình phân tích được tiến hành qua hai bước: (1) sử dụng phương pháp Taguchi để phân tích và tối ưu hóa cho từng mục tiêu một cách độc lập; (2) tích hợp phương pháp TOPSIS để tìm ra bộ thông số tối ưu hóa đồng thời nhiều mục tiêu. Trọng số của các mục tiêu

**Bảng 3. Thiết kế thực nghiệm Taguchi L9 và kết quả**

| STT | Thông số |    |     | Kết quả     |                  |               | Tỷ số S/N |               |            |
|-----|----------|----|-----|-------------|------------------|---------------|-----------|---------------|------------|
|     | T        | V  | D   | Độ cứng, HD | Độ dai va đập, J | Khối lượng, g | Độ cứng   | Độ dai va đập | Khối lượng |
| 1   | 200      | 40 | 0.2 | 74.8        | 37.0             | 23.15         | 37.84     | 31.36         | -27.29     |
| 2   | 200      | 50 | 0.3 | 75.0        | 38.0             | 22.17         | 37.56     | 31.60         | -26.92     |
| 3   | 200      | 60 | 0.4 | 76.7        | 29.0             | 23.63         | 37.73     | 29.25         | -27.47     |
| 4   | 210      | 40 | 0.3 | 68.5        | 33.0             | 22.74         | 37.86     | 30.37         | -27.14     |
| 5   | 210      | 50 | 0.4 | 76.7        | 27.0             | 23.43         | 37.97     | 28.63         | -27.40     |
| 6   | 210      | 60 | 0.2 | 70.5        | 21.0             | 22.37         | 37.92     | 26.44         | -26.99     |
| 7   | 220      | 40 | 0.4 | 76.2        | 34.0             | 23.86         | 38.19     | 30.63         | -27.55     |
| 8   | 220      | 50 | 0.2 | 74.7        | 35.0             | 22.64         | 37.99     | 30.88         | -27.10     |
| 9   | 220      | 60 | 0.3 | 75.5        | 36.0             | 22.85         | 37.93     | 31.13         | -27.18     |

trong mô hình TOPSIS được xác định bằng phương pháp Entropy. Sau khi xác định được bộ thông số tối ưu, phân tích ANOVA được thực hiện nhằm đánh giá mức độ ảnh hưởng và phần trăm đóng góp của từng thông số đến kết quả đa mục tiêu. Thí nghiệm được thiết kế theo ma trận trực giao L9 với các thông số và mức độ được trình bày trong Bảng 3. Toàn bộ quá trình tính toán, phân tích thống kê và đồ thị được thực hiện bằng phần mềm Minitab 21.

Tỷ số Tín hiệu trên Nhiễu (S/N) được sử dụng để đánh giá ảnh hưởng của các thông số quy trình đến các mục tiêu. Các tỷ số S/N từ phương pháp Taguchi, đại diện cho hiệu suất của các thí nghiệm, bộ thông số có tỷ số S/N cao nhất cho biết mức tối ưu. Với mục tiêu tối đa hóa độ dai va đập, độ cứng và tối thiểu hóa khối lượng mẫu, phương trình (1) được áp dụng cho độ dai va đập, độ cứng. Trong khi, phương trình (2) áp dụng cho tiêu chí "càng nhỏ càng tốt" được lựa chọn cho khối lượng mẫu.

$$S/N = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (1)$$

$$S/N = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (2)$$

Trong đó,  $n$  là số lượng thí nghiệm và  $y_i$  là giá trị thí nghiệm cho đặc tính thứ  $i$ .

Tỷ số S/N chỉ phù hợp cho bài toán đơn mục tiêu, để tối ưu đa mục tiêu khi yêu cầu thông số in 3D sao cho vừa đạt được độ dai va đập, độ cứng cao nhất, vừa đạt được thời gian thi công và khối lượng mẫu thấp nhất, do đó Entropy-TOPSIS được sử dụng để tối ưu hóa đa mục tiêu dựa trên các tỷ số S/N.



Hình 3. Quy trình tối ưu thông số theo thiết kế Taguchi và Entropy-TOPSIS

Quy trình thực hiện được thể hiện trong Hình 3, gồm các bước:

**Bước 1:** Mỗi tiêu chí trong ma trận quyết định được chuẩn hóa theo phương trình (3):

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^n x_{ij}} \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

Trong phương trình (3),  $x_{ij}$  biểu thị giá trị thực của mỗi phương án, trong khi  $p_{ij}$  biểu thị các giá trị dạng chuẩn hóa cho mỗi tiêu chí.

**Bước 2:** Dựa vào ma trận quyết định đã chuẩn hóa, các giá trị entropy ( $e_j$ ) cho mỗi tiêu chí được tính bằng phương trình (4) như sau:

$$e_j = -k \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln p_{ij} \quad (4)$$

Trong phương trình (4),  $k$  được tính bằng  $1/\ln(n)$  và là một hằng số đảm bảo  $0 \leq e_j \leq 1$ . Khi giá trị entropy càng nhỏ, tầm quan trọng của tiêu chí trong quá trình ra quyết định càng cao. Nói cách khác, giá trị entropy cho thấy sự không chắc chắn của thông tin về một tiêu chí.

**Bước 3:** Trọng số của các tiêu chí theo phương pháp entropy được tính theo phương trình (5):

$$w_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{i=1}^n 1 - e_j} \quad (5)$$

Trong đó  $w_j$  là giá trị trọng số của các tiêu chí và tổng tất cả các giá trị  $w_j$  ( $w_1 + w_2 + \dots + w_n$ ) phải bằng 1.

**Bước 4:** Chuẩn hóa ma trận theo TOPSIS:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{j=1}^J x_{ij}^2} \quad i = 1, 2, \dots, n; \quad j = 1, 2, \dots, J \quad (6)$$

$r_{ij}$  thể hiện giá trị đã được chuẩn hóa và  $x_{ij}$  là giá trị của phương án  $i$  theo tiêu chí  $j$ .

**Bước 5:** Ma trận quyết định chuẩn hóa có trọng số thu được bằng cách nhân ma trận đã chuẩn hóa với trọng số của các tiêu chí ( $w_j$ ).

$$v_{ij} = w_j \times r_{ij} \quad j = 1, 2, \dots, J; i = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

**Bước 6:** Giải pháp lý tưởng (giá trị lớn nhất,  $A^+$ ) và giải pháp kém nhất (giá trị nhỏ nhất,  $A^-$ ) được xác định:

$$A^+ = \{v_1^+, v_2^+, \dots, v_J^+\} \quad (8)$$

$$A^- = \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_J^-\}$$

**Bước 7:** Khoảng cách giữa mỗi phương án được tính bằng cách sử dụng khoảng cách Euclid n-chiều như sau:

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^J (v_{ij} - v_i^+)^2}, \quad j = 1, 2, \dots, J$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^J (v_{ij} - v_i^-)^2}, \quad j = 1, 2, \dots, J$$

(9)

Trong đó,  $d_i^+$  tượng trưng cho thước đo khoảng cách đến giải pháp lý tưởng và  $d_i^-$  cho thước đo khoảng cách đến giải pháp kém nhất.

**Bước 8:** Hệ số tương đối gần (CC<sub>i</sub>) của mỗi phương án được tính bằng phương trình sau:

$$CC_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-} \quad (10)$$

**Bước 9:** Cuối cùng, các phương án được xếp hạng bằng cách so sánh các giá trị CC<sub>i</sub>, phương án có giá trị CC<sub>i</sub> lớn nhất là phương án tối ưu.

### 3. Kết quả và thảo luận

#### 3.1. Tối ưu đơn mục tiêu

Bảng 3 trình bày kết quả thí nghiệm và các giá trị tỷ số S/N của độ cứng, độ dai va đập và khối lượng mẫu in. Phương pháp thiết kế thí nghiệm của Taguchi đánh giá kết quả thí nghiệm bằng cách chuyển đổi chúng thành tỷ số S/N. Tỷ số này là một thước đo so sánh các đầu vào với mức nhiễu liên quan. Việc sử dụng tỷ số S/N bao hàm một ưu tiên đồng nhất trong việc bao quát các ảnh hưởng của những thay đổi về giá trị trung bình và độ lệch chuẩn. Trong nghiên cứu này, các kết quả thử nghiệm đã được chuyển đổi thành các tỷ số S/N, giá trị S/N cao nhất cho biết thông số thí nghiệm tốt nhất.

Kết quả phân tích ảnh hưởng của các thông số công nghệ đến độ cứng của mẫu in PLA được trình bày trong Bảng 4 và phân tích ANOVA Bảng 5. Dựa trên tỷ số S/N theo tiêu chí "càng lớn càng tốt", tổ hợp thông số tối ưu độ cứng được xác định là: Nhiệt độ in ở 220°C, tốc độ in ở 40mm/s và đường kính đầu in là

0,4mm. Phân tích giá trị Delta cho thấy nhiệt độ in là yếu tố có ảnh hưởng lớn nhất, tiếp theo là đường kính đầu in và cuối cùng là tốc độ in. Ảnh hưởng của nhiệt độ và đường kính đầu in đến độ cứng cũng được thể hiện qua Hình 4 với xu hướng tăng nhiệt độ và đường kính đầu in sẽ tạo ra sản phẩm in có tỷ lệ điền đầy cao, liên kết tốt giữa các lớp in làm tăng độ cứng của mẫu gần đạt đến độ cứng của vật liệu PLA đặc ban đầu.

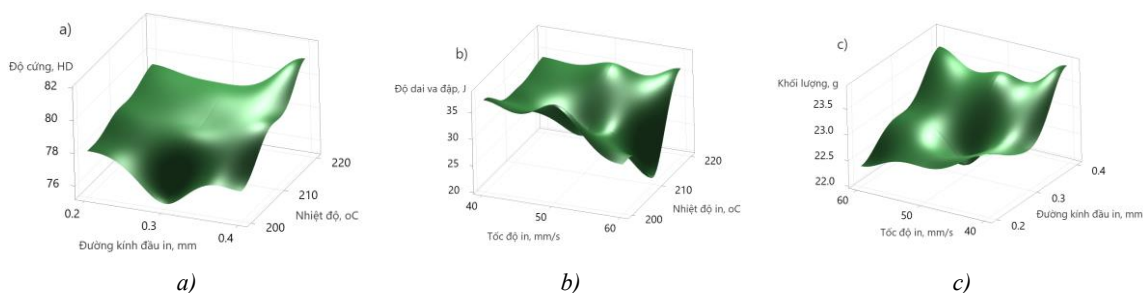
**Bảng 4. Giá trị đáp ứng S/N của độ cứng**

| Mức độ   | Nhiệt độ in  | Tốc độ in    | Đường kính đầu in |
|----------|--------------|--------------|-------------------|
| 1        | 37.71        | <b>37.96</b> | 37.92             |
| 2        | 37.92        | 37.84        | 37.78             |
| 3        | <b>38.04</b> | 37.86        | <b>37.96</b>      |
| Delta    | 0.33         | 0.12         | 0.18              |
| Xếp hạng | 1            | 3            | 2                 |

**Bảng 5. Phân tích ANOVA của độ cứng**

| Thông số          | DF | Adj SS | Adj MS | F-Value | P-Value | Tác động, % |
|-------------------|----|--------|--------|---------|---------|-------------|
| Nhiệt độ in       | 2  | 13.26  | 6.63   | 35.23   | 0.028   | 66.47       |
| Tốc độ in         | 2  | 2.15   | 1.07   | 5.72    | 0.149   | 10.78       |
| Đường kính đầu in | 2  | 4.15   | 2.07   | 11.03   | 0.083   | 20.80       |
| Lỗi               | 2  | 0.37   | 0.18   |         |         | 1.85        |
| Tổng              | 8  | 19.95  |        |         |         | 100.00      |

Phân tích ANOVA được thực hiện ở mức độ tin cậy 10% để xác thực ý nghĩa thống kê của các yếu tố này. Kết quả ANOVA khẳng định vai trò chi phối của nhiệt độ in, đây là yếu tố duy nhất có ảnh hưởng mang ý nghĩa thống kê ( $p\text{-value}=0,028$ ). Hai thông số còn lại, đường kính đầu in và tốc độ in được xác định không có ảnh hưởng đáng kể về mặt thống kê. Phân tích phần trăm đóng góp cũng củng cố thêm kết luận này, khi nhiệt độ in chiếm tới 66,47% tổng biến động của độ cứng, vượt trội hoàn toàn so với đường kính đầu in (20,80%) và tốc độ in (10,78%). Tỷ lệ sai số rất thấp



**Hình 4. Đồ thị ảnh hưởng thông số in đến các đặc tính của mẫu in**

**Bảng 6. Giá trị đáp ứng S/N của độ dai và đập**

| Mức độ   | Nhiệt độ in  | Tốc độ in    | Đường kính đầu in |
|----------|--------------|--------------|-------------------|
| 1        | 30.74        | <b>30.79</b> | 29.56             |
| 2        | 28.48        | 30.37        | <b>31.03</b>      |
| 3        | <b>30.88</b> | 28.94        | 29.50             |
| Delta    | 2.40         | 1.85         | 1.53              |
| Xếp hạng | 1            | 2            | 3                 |

**Bảng 7. Phân tích ANOVA của độ dai và đập**

| Thông số          | DF | Adj SS | Adj MS | F-Value | P-Value | Tác động, % |
|-------------------|----|--------|--------|---------|---------|-------------|
| Nhiệt độ in       | 2  | 122.89 | 61.44  | 14.95   | 0.06    | 50.05       |
| Tốc độ in         | 2  | 59.56  | 29.78  | 7.24    | 0.12    | 24.25       |
| Đường kính đầu in | 2  | 54.89  | 27.44  | 6.68    | 0.13    | 22.35       |
| Lỗi               | 2  | 8.22   | 4.11   |         |         | 3.35        |
| Tổng              | 8  | 245.56 |        |         |         | 100.00      |

(1,85%) cho thấy mô hình thí nghiệm có độ tin cậy cao và các kết luận rút ra là có cơ sở vững chắc.

Đối với tiêu chí độ dai và đập, mục tiêu là "càng lớn càng tốt" (Bảng 6 và Bảng 7). Phân tích tỷ số S/N từ phương pháp Taguchi chỉ ra tổ hợp tối ưu độ dai và đập là nhiệt độ in ở 220°C, tốc độ in ở 40mm/s và đường kính đầu in là 0,3mm. Phân tích giá trị Delta xếp hạng nhiệt độ in là yếu tố có ảnh hưởng lớn nhất tiếp theo là tốc độ in và đường kính đầu in. Ảnh hưởng của nhiệt độ và tốc độ in đến độ dai và đập cũng được thể hiện trên đồ thị Hình 4.b. Kết quả ANOVA cũng có thứ hạng này, cho thấy nhiệt độ in là yếu tố đóng góp chủ chốt, chiếm 50,05% tổng biến động. Giá trị  $p$ -value của nhiệt độ in ( $p$ -value=0,063) cho thấy đây là yếu tố có ý nghĩa thống kê và ảnh hưởng đáng kể nhất đến độ dai và đập. Tỷ lệ sai số rất thấp là 3,35% cũng khẳng định độ tin cậy của mô hình thí nghiệm.

Đối với tiêu chí khối lượng mẫu in, mục tiêu là "càng nhỏ càng tốt" (Bảng 8 và Bảng 9). Phân tích S/N xác định bộ thông số tối ưu để giảm thiểu khối lượng là nhiệt độ in đạt 210°C, tốc độ in ở 50mm/s và đường kính đầu in là 0,2mm. Trái ngược với độ dai và đập, đường kính đầu in được xác định là yếu tố có ảnh hưởng lớn nhất, tiếp theo là tốc độ in, cuối cùng là nhiệt độ in. Phân tích ANOVA khẳng định vai trò chi phối tuyệt đối của đường kính đầu in, khi nó đóng góp tới 74,57% vào tổng biến động. Tương tự như trên, thông số đường kính đầu in với giá trị  $p$ -value=0,083 là yếu tố có ý nghĩa thống kê và ảnh hưởng rõ rệt nhất.

Kết quả quá trình tối ưu đơn mục tiêu thông qua tỷ số S/N của phương pháp Taguchi được thể hiện trong Bảng 14.

**Bảng 8. Giá trị đáp ứng S/N của khối lượng mẫu**

| Mức độ   | Nhiệt độ in   | Tốc độ in     | Đường kính đầu in |
|----------|---------------|---------------|-------------------|
| 1        | -27.23        | -27.33        | -27.13            |
| 2        | <b>-27.17</b> | <b>-27.14</b> | <b>-27.08</b>     |
| 3        | -27.28        | -27.21        | -27.47            |
| Delta    | 0.10          | 0.19          | 0.40              |
| Xếp hạng | 3             | 2             | 1                 |

**Bảng 9. Phân tích ANOVA của khối lượng mẫu**

| Thông số          | DF | Adj SS | Adj MS | F-Value | P-Value | Tác động, % |
|-------------------|----|--------|--------|---------|---------|-------------|
| Nhiệt độ in       | 2  | 0.11   | 0.05   | 0.61    | 0.621   | 4.13        |
| Tốc độ in         | 2  | 0.38   | 0.19   | 2.15    | 0.317   | 14.54       |
| Đường kính đầu in | 2  | 1.97   | 0.99   | 11.04   | 0.083   | 74.57       |
| Lỗi               | 2  | 0.18   | 0.09   |         |         | 6.76        |
| Tổng              | 8  | 2.65   |        |         |         | 100         |

### 3.2. Tối ưu đa mục tiêu

Tối ưu hóa đa mục tiêu cần phải tìm ra phương án cân bằng giữa các lợi ích, tuy nhiên phân tích tỷ số S/N của Taguchi chỉ áp dụng được cho một tiêu chí riêng lẻ. Để xác định thông số in tốt nhất đáp ứng đồng thời các tiêu chí, chúng ta tìm cách đưa chỉ số S/N của các tiêu chí về một giá trị chuẩn hóa để dễ dàng lựa chọn thông qua phương pháp TOPSIS. Phương pháp TOPSIS yêu cầu cần có trọng số của các tiêu chí, vấn đề này được giải quyết bằng phương pháp Entropy theo các bước 1, 2 và 3 trong quy trình thực hiện tối ưu.

Các bước theo Entropy bao gồm chuẩn hóa ma trận tỷ số S/N, tính toán các giá trị Entropy và cuối cùng kết quả trọng số các tiêu chí được thể hiện trong Bảng 10. Kết quả cho thấy tầm quan trọng của các tiêu chí đặt ra đến quyết định là tương đối đồng đều.

Quá trình tối ưu với TOPSIS bắt đầu từ bước thứ 4 bằng việc chuẩn hóa ma trận quyết định S/N đã được xây dựng. Quá trình này sẽ chuyển đổi các đặc tính khác nhau thành các đặc tính không thứ nguyên, do đó cho phép đánh giá dựa trên một loạt các tiêu chí. Trong tính toán TOPSIS, có hai hàm liên quan đến các tiêu chí được gọi là hàm lợi ích và hàm chi phí hay là hàm tối đa hóa và tối thiểu hóa. Ở đây, các tiêu chí được đánh giá thông qua tỷ số S/N của Taguchi nên các hàm tối đa hóa được áp dụng. Trọng số của mỗi tiêu chí tương ứng trong ma trận chuẩn hóa được nhân với các thông số đầu ra ở bước 4.

Các giải pháp lý tưởng là các giải pháp tốt nhất và các giải pháp kém nhất được xác định từ ma trận có trọng số. Một giải pháp lý tưởng kéo theo sự gia tăng

**Bảng 10. Xác định trọng số các tiêu chí theo Entropy**

| STT | Ma trận quyết định S/N |               |            | Ma trận chuẩn hóa Entropy |               |            | Giá trị entropy |               |            |
|-----|------------------------|---------------|------------|---------------------------|---------------|------------|-----------------|---------------|------------|
|     | Độ cứng                | Độ dai va đập | Khối lượng | Độ cứng                   | Độ dai va đập | Khối lượng | Độ cứng         | Độ dai va đập | Khối lượng |
| 1   | 37.84                  | 31.36         | -27.29     | 0.1428                    | 0.1506        | 0.1431     | 1.1390          | 1.1430        | 1.1381     |
| 2   | 37.56                  | 31.60         | -26.92     | 0.1417                    | 0.1517        | 0.1411     |                 |               |            |
| 3   | 37.73                  | 29.25         | -27.47     | 0.1423                    | 0.1404        | 0.1440     |                 |               |            |
| 4   | 37.86                  | 30.37         | -27.14     | 0.1428                    | 0.1458        | 0.1423     |                 |               |            |
| 5   | 37.97                  | 28.63         | -27.40     | 0.1432                    | 0.1375        | 0.1436     |                 |               |            |
| 6   | 37.92                  | 26.44         | -26.99     | 0.1431                    | 0.1269        | 0.1415     |                 |               |            |
| 7   | 38.19                  | 30.63         | -27.55     | 0.1441                    | 0.1471        | 0.1444     |                 |               |            |
| 8   | 37.99                  | 30.88         | -27.10     | 0.1433                    | 0.1483        | 0.1421     |                 |               |            |
| 9   | 37.93                  | 31.13         | -27.18     | 0.1431                    | 0.1495        | 0.1425     |                 |               |            |

| Giá trị trong số |               |            |
|------------------|---------------|------------|
| Độ cứng          | Độ dai va đập | Khối lượng |
| 0.3308           | 0.3404        | 0.3288     |

**Bảng 11. Xác định phương án tối ưu theo TOPSIS**

| STT | Ma trận chuẩn hóa |               |            | Ma trận chuẩn hóa có trọng số |               |            | Khoảng cách     |                 | Hệ số tương đối gần (CC <sub>i</sub> ) | Xếp hạng |
|-----|-------------------|---------------|------------|-------------------------------|---------------|------------|-----------------|-----------------|----------------------------------------|----------|
|     | Độ cứng           | Độ dai va đập | Khối lượng | Độ cứng                       | Độ dai va đập | Khối lượng | d <sub>i+</sub> | d <sub>i-</sub> |                                        |          |
| 1   | 0.3329            | 0.3476        | -0.3341    | 0.1101                        | 0.1183        | -0.1099    | 0.0020          | 0.0186          | 0.9021                                 | 2        |
| 2   | 0.3304            | 0.3503        | -0.3296    | 0.1093                        | 0.1192        | -0.1084    | 0.0018          | 0.0196          | 0.9146                                 | 1        |
| 3   | 0.3319            | 0.3242        | -0.3363    | 0.1098                        | 0.1104        | -0.1106    | 0.0092          | 0.0106          | 0.5348                                 | 7        |
| 4   | 0.3331            | 0.3366        | -0.3323    | 0.1102                        | 0.1146        | -0.1093    | 0.0048          | 0.0149          | 0.7561                                 | 6        |
| 5   | 0.3341            | 0.3173        | -0.3354    | 0.1105                        | 0.1080        | -0.1103    | 0.0114          | 0.0084          | 0.4236                                 | 8        |
| 6   | 0.3336            | 0.2931        | -0.3304    | 0.1104                        | 0.0998        | -0.1087    | 0.0195          | 0.0025          | 0.1131                                 | 9        |
| 7   | 0.3360            | 0.3395        | -0.3373    | 0.1111                        | 0.1156        | -0.1109    | 0.0045          | 0.0159          | 0.7814                                 | 5        |
| 8   | 0.3342            | 0.3423        | -0.3318    | 0.1106                        | 0.1165        | -0.1091    | 0.0029          | 0.0169          | 0.8548                                 | 4        |
| 9   | 0.3337            | 0.3450        | -0.3328    | 0.1104                        | 0.1174        | -0.1094    | 0.0022          | 0.0178          | 0.8902                                 | 3        |

|                         |    |        |        |         |
|-------------------------|----|--------|--------|---------|
| Các giải pháp lý tưởng: | A+ | 0.1111 | 0.1192 | -0.1084 |
|                         | A- | 0.1093 | 0.0998 | -0.1109 |

hàm tối đa hóa và giảm hàm tối thiểu hóa, điều này ngược lại đối với giải pháp kém nhất. Từ một giải pháp lý tưởng và một giải pháp lý kém nhất, chúng ta tính toán các giá trị phân tách. Khái niệm khoảng cách Euclide được sử dụng để đánh giá các giá trị đo lường sự tách biệt này. Các giá trị độ gần tương đối CC<sub>i</sub> được sử dụng để xếp hạng các phương án. Kết quả quá trình tính toán được thể hiện trong Bảng 11.

Theo phương pháp TOPSIS, thí nghiệm số 2 được xếp hạng 1 với các thông số nhiệt độ 200°C, tốc độ in 50mm/s và đường kính đầu in 0,3mm. Tuy nhiên, mục tiêu nghiên cứu không phải là chọn ra thí nghiệm tốt nhất trong 9 thí nghiệm L9 mà là dự đoán bộ thông số tối ưu cho cả ba mục tiêu. Trong nghiên cứu này, TOPSIS được dùng để chuyển bài toán đa mục tiêu về đơn mục tiêu là tối ưu hóa chỉ số CC<sub>i</sub>. Sau đó, nghiên cứu tiếp tục dùng phương pháp Taguchi để phân tích S/N cho chính chỉ số CC<sub>i</sub> này.

Kỹ thuật phân tích S/N tiếp tục được sử dụng để phân tích ảnh hưởng của các thông số in đến hệ số CC<sub>i</sub>. Phân tích tỷ số S/N cho CC<sub>i</sub> của mỗi thông số

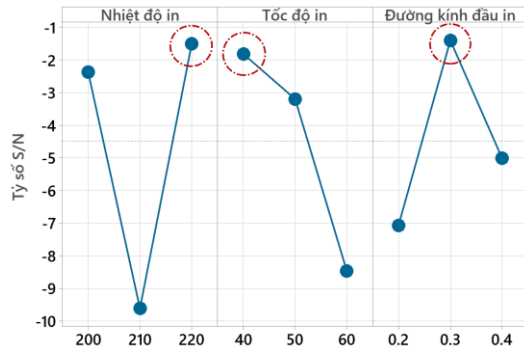
được đưa ra trong Bảng 12. Các mức độ quan trọng được suy ra từ thứ tự độ lớn của các giá trị Delta. Đối với đặc tính CC<sub>i</sub> tối đa, thứ tự quan trọng là nhiệt độ in, tốc độ in và đường kính đầu in. Ngoài ra, Hình 5 minh họa các mức thông số liên quan đến việc đạt được hiệu suất đa mục tiêu lớn nhất.

**Bảng 12. Giá trị đáp ứng S/N của hệ số CC<sub>i</sub>**

| Mức độ   | Nhiệt độ in | Tốc độ in | Đường kính đầu in |
|----------|-------------|-----------|-------------------|
| 1        | -2.369      | -1.822    | -7.063            |
| 2        | -9.607      | -3.200    | -1.405            |
| 3        | -1.505      | -8.459    | -5.013            |
| Delta    | 8.102       | 6.637     | 5.658             |
| Xếp hạng | 1           | 2         | 3                 |

Kết quả CC<sub>i</sub> cũng được phân tích bằng kỹ thuật ANOVA để đánh giá ảnh hưởng của các thông số và các được trình bày trong Bảng 13. Thông số nhiệt độ in có ý nghĩa thống kê với giá trị p (p-value) nhỏ hơn 0,1. Có thể thấy nhiệt độ in là thông số có ảnh hưởng lớn nhất đến các đặc tính hiệu suất đa mục tiêu, với tỷ

lệ tác động là 49,25%. Trong khi tốc độ in và đường kính đầu in có mức độ ảnh hưởng tương đương nhau trong khoảng 21 đến 23%. Ngoài ra, mô hình tuyến tính được sử dụng trong phân tích này thể hiện độ chính xác với giá trị  $R^2$  là 94,77%, điều này xác nhận khả năng dự đoán chính xác của mô hình. Bảng 14 cho thấy sự khác biệt trong kết quả tối ưu đơn mục tiêu của phương pháp Taguchi và đa mục tiêu khi kết hợp Taguchi - TOPSIS.



Hình 5. Đồ thị ảnh hưởng thông số đến S/N

Bảng 13. Phân tích ANOVA của hệ số  $CC_i$

| Thông số          | DF | Adj SS | Adj MS | F-Value | P-Value | Tác động, % |
|-------------------|----|--------|--------|---------|---------|-------------|
| Nhiệt độ in       | 2  | 0.30   | 0.15   | 9.42    | 0.09    | 49.25       |
| Tốc độ in         | 2  | 0.14   | 0.07   | 4.59    | 0.17    | 23.99       |
| Đường kính đầu in | 2  | 0.13   | 0.06   | 4.12    | 0.19    | 21.53       |
| Lỗi               | 2  | 0.03   | 0.02   |         |         | 5.23        |
| Tổng              | 8  | 0.60   |        |         |         | 100.00      |

Bảng 14. So sánh kết quả tối ưu

| Phương pháp    | Mục tiêu      | Thông số     |
|----------------|---------------|--------------|
| Taguchi        | Độ cứng       | 220, 40, 0.4 |
| Taguchi        | Độ dai và đập | 220, 40, 0.3 |
| Taguchi        | Khối lượng in | 210, 50, 0.3 |
| Taguchi-TOPSIS | Đa mục tiêu   | 220, 40, 0.3 |

Bảng 15. So sánh kết quả kiểm chứng

| Thông số         | TOPSIS T1V2D2 | Dự đoán T3V1D2 | Kiểm chứng T3V1D2 |
|------------------|---------------|----------------|-------------------|
| Độ cứng, HD      | 75.0          | 79.5           | 77.3              |
| Độ dai và đập, J | 38.0          | 40.9           | 41.0              |
| Khối lượng, g    | 22.17         | 22.98          | 22.74             |

Bảng 15 so sánh kết quả giữa thí nghiệm số 2 tốt nhất theo TOPSIS với kết quả dự đoán Taguchi và tối ưu bằng phương pháp lai Taguchi-TOPSIS. Phân tích cho thấy các kết quả kiểm chứng đạt được độ cứng 77,3 HD, độ dai và đập 41,0J, khối lượng 22,74g thu được từ bộ thông số tối ưu (T3V1D2) đều rất gần với các giá trị dự đoán với sai số đều dưới 5%. Hơn nữa, kết quả kiểm chứng này đã vượt trội hơn so với phương án tốt nhất trong ma trận L9 ban đầu (thí nghiệm số 2 T1V2D2). Cụ thể, bộ thông số tối ưu T3V1D2 đã cải thiện độ cứng tăng 3,1% và độ dai và đập tăng 7,9%. Tuy nhiên, khối lượng mẫu in tăng lên nhưng không đáng kể, tăng 2,6%. Điều này khẳng định T3V1D2 là bộ thông số cân bằng và tốt hơn.

#### 4. Kết luận

Nghiên cứu này đã áp dụng thành công phương pháp lai Taguchi - TOPSIS để tối ưu hóa đa mục tiêu độ cứng, độ dai và đập, khối lượng cho các thông số in 3D FDM của vật liệu PLA. Bằng cách tích hợp các mục tiêu sử dụng phương pháp TOPSIS với trọng số từ Entropy, sau đó kết hợp phân tích chỉ số S/N của Taguchi, nghiên cứu đã xác định được một bộ thông số tối ưu là nhiệt độ in 220°C, tốc độ in 40mm/s và đường kính đầu in 0,3mm. Phân tích ANOVA của hiệu suất đa mục tiêu ( $CC_i$ ) khẳng định nhiệt độ in là thông số có ảnh hưởng lớn nhất, đóng góp 49,25% vào kết quả chung. Quy trình này đã được chứng minh là một phương pháp hiệu quả và đáng tin cậy để giải quyết các bài toán tối ưu hóa phức tạp trong công nghệ FDM.

#### Lời cảm ơn

Nghiên cứu này được tài trợ bởi Trường Đại học Hàng hải Việt Nam trong đề tài mã số: **DT25-26.40**.

#### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Ahmad, N. N., Wong, Y. H. & Ghazali, N. N. N. (2022). *A systematic review of fused deposition modeling process parameters*. In Soft Science (Vol. 2, Issue 3).  
<https://doi.org/10.20517/ss.2022.08>.
- [2] Chinchani, S., Shinde, S., Shaikh, A., Gaikwad, V. & Ambhore, N. H. (2024). *Multi-objective Optimization of FDM Using Hybrid Genetic Algorithm-Based Multi-criteria Decision-Making (MCDM) Techniques*. Journal of The Institution of Engineers (India): Series D, Vol.105(1).  
<https://doi.org/10.1007/s40033-023-00459-w>.
- [3] Dimitrellou, S., Strantzali, E. & Iakovidis, I. (2025). *A decision-making strategy for selection of FDM-based additively manufactured*

- thermoplastics for industrial applications based on material attributes*. Sustainable Futures, Vol9, 100640.  
<https://doi.org/10.1016/J.SFTR.2025.100640>.
- [4] Horný, L., Petřivý, Z., Sobotka, Z., Kohan, M., Balint, T., Chlup, H., Kronek, J., Mendová, K., Hudák, R., Schnitzer, M., Danko, M. & Hlubeňová, J. (2025). *Notes on constitutive modeling of 3D-printed PLA materials*. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, Vol.169, 107083.  
<https://doi.org/10.1016/J.JMBBM.2025.107083>.
- [5] John, J., Devjani, D., Ali, S., Abdallah, S. & Pervaiz, S. (2023). *Optimization of 3D printed polylactic acid structures with different infill patterns using Taguchi-grey relational analysis*. Advanced Industrial and Engineering Polymer Research, Vol.6(1).  
<https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2022.06.002>.
- [6] Kelemenis, A. & Askounis, D. (2010). *A new TOPSIS-based multi-criteria approach to personnel selection*. Expert Systems with Applications, Vol.37(7).  
<https://doi.org/10.1016/j.eswa.2009.12.013>.
- [7] Kumar, K. & Singh, H. (2023). *Multi-Objective Optimization of Fused Deposition Modeling for Mechanical Properties of Biopolymer Parts Using the Grey-Taguchi Method*. Chinese Journal of Mechanical Engineering (English Edition), Vol.36(1).  
<https://doi.org/10.1186/s10033-023-00847-z>.
- [8] Kumar, R., Kumar, M. & Chohan, J. S. (2021). *The role of additive manufacturing for biomedical applications: A critical review*. Journal of Manufacturing Processes, Vol.64, pp.828-850.  
<https://doi.org/10.1016/J.JMAPRO.2021.02.022>.
- [9] Liu, X., Zhang, M., Li, S., Si, L., Peng, J. & Hu, Y. (2017). *Mechanical property parametric appraisal of fused deposition modeling parts based on the gray Taguchi method*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol.89(5-8).  
<https://doi.org/10.1007/s00170-016-9263-3>.
- [10] Nguyen, V. H., Huynh, T. N., Nguyen, T. P. & Tran, T. T. (2020). *Single and multi-objective optimisation of processing parameters for fused deposition modelling in 3D printing technology*. International Journal of Automotive and Mechanical Engineering, Vol.17(1).  
<https://doi.org/10.15282/IJAME.17.1.2020.03.0558>.
- [11] Patel, K., Acharya, S. & Acharya, G. D. (2024). *Multi Objective Optimization of FDM Parameters Using Taguchi Grey Relation Analysis for PLA Specimen*. Jurnal Kejuruteraan, Vol.36(1).  
[https://doi.org/10.17576/jkukm-2024-36\(1\)-11](https://doi.org/10.17576/jkukm-2024-36(1)-11).
- [12] Singh, J., Goyal, K. K., Kumar, R. & Gupta, V. (2022). *Influence of process parameters on mechanical strength, build time, and material consumption of 3D printed polylactic acid parts*. Polymer Composites, Vol.43(9).  
<https://doi.org/10.1002/pc.26849>.
- [13] Taherdoost, H. & Madanchian, M. (2024). *A Comprehensive Survey and Literature Review on TOPSIS*. International Journal of Service Science, Management, Engineering, and Technology, Vol.15(1).  
<https://doi.org/10.4018/IJSSMET.347947>.
- [14] Tofail, S. A. M., Koumoulos, E. P., Bandyopadhyay, A., Bose, S., O'Donoghue, L. & Charitidis, C. (2018). *Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities*. Materials Today, Vol.21(1), pp.22-37.  
<https://doi.org/10.1016/J.MATTOD.2017.07.001>.

|                    |            |
|--------------------|------------|
| Ngày nhận bài:     | 22/10/2025 |
| Ngày nhận bản sửa: | 06/11/2025 |
| Ngày duyệt đăng:   | 13/11/2025 |